

Aspekty pracy wyjściowego filtra LC w energoelektronicznym źródle napięcia

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane aspekty pracy filtra LC zaimplementowanego w energoelektronicznym sterowanym źródle napięcia, którego zadaniem jest minimalizacja składowej nośnej modulacji impulsowej w napięciu wyjściowym źródła. Niewielka wartość współczynnika tłumienia filtra – w połączeniu z sygnałem o dużej dynamice zmian na jego wejściu – prowadzić może do wystąpienia w napięciu wyjściowym filtra składowej oscylacyjnej o amplitudzie, której wartość może znacznie przekraczać parametry znamionowe układu. Grozi to uszkodzeniem tak jego części silnoprądowej, jak i odbiornika. Ponadto, w przypadku zmieniających się parametrów odbiornika następuje również zmiana parametrów funkcji transmitancji filtra, co może być przyczyną niestabilnej pracy układu, jako zamkniętego systemu regulacji automatycznej. W artykule zaproponowano rozwiązanie sprzętowe minimalizujące te zjawiska oraz przedstawiono rezultaty badań modelu symulacyjnego źródła.

Abstract. The paper presents selected aspects of the work of a LC filter implemented in a power electronics controlled voltage source, the purpose of which is to minimize PWM components in a source output voltage. A small value of a filter damping factor in conjunction with a control signal about high dynamics of change can cause that in a source output voltage strong oscillatory component can appear. A value of amplitude of this component may exceed nominal system ratings. This may cause damage of both, a filter and a receiver. Moreover, in case of changing of receiver parameters a filter transfer function is also an subject of changes what can lead to unstable of a source work. The article proposes a hardware solution for minimization of this phenomenon. It also presents selected research results of the voltage source simulation model. **(Aspects of the work of a LC output filter in a power electronics voltage source).**

Słowa kluczowe: energoelektroniczne źródło sterowane, filtr LC, MSI, współczynnik tłumienia.

Keywords: damping factor, LC filter, power electronics controlled source, PWM.

doi:10.12915/pe.2014.11.23

Wprowadzenie

Zadaniem układów energoelektronicznych (przekształtników) jest przekształcanie energii elektrycznej pobieranej ze źródła o określonych (najczęściej narzuconych) parametrach na napięcie (prąd) o kształcie i częstotliwości wymaganej przez odbiornik energii elektrycznej, a także sterowanie przepływem tej energii. Zgodnie z nowoczesnymi tendencjami związanymi z zadaniami zapewnienia odpowiedniej jakości energii elektrycznej, przekształtniki nie powinny zakłócać pracy źródeł energii, pobierając z nich energię tylko o wartości, która jest niezbędna do wykonania określonej pracy przez odbiornik. Winno być to realizowane za pomocą energetycznych sygnałów napięcia lub prądu, w sposób optymalny, ze względu na zadania wykonywane przez odbiornik. Zapotrzebowanie na tego typu układy występuje w wielu dziedzinach techniki.

Rozumianym w ten sposób zagadnieniem przekształcania energii wychodzą naprzeciw m.in. energoelektroniczne szerokopasmowe sterowane źródła napięć i prądów. Zastosowane tam rozwiązania, bazujące m.in. na teorii sygnałów i teorii sterowania wykorzystują koncepcję elektrycznych układów zamkniętych, czasowo-dyskretnych, z przekształtnikami niezależnymi, pracującymi w oparciu o modulację impulsową oraz energetyczne filtry pasywne przy jednoczesnym zastąpieniu klasycznych regulatorów szerokopasmowymi filtrami cyfrowymi. Dzięki takiemu podejściu możliwym stał się znaczący wzrost jakości sygnałów napięcia (prądu) na wyjściu energetycznym (w sensie wierności odwzorowania w sygnale zadany), nastąpiło poszerzenie efektywnego pasma przenoszenia oraz uległ ograniczeniu – dzięki zastosowaniu pasywnych filtrów LC na wyjściu energetycznym – poziom szeroko rozumianej emisji zakłóceń elektromagnetycznych. Natomiast występujące tam zjawiska związane z opóźnieniami sygnałów w torze sterowania i energetycznym (m.in. skończoną wartością częstotliwości próbkowania oraz nośnej modulacji impulsowych) oraz szerokopasmowym charakterem procesu próbkowania i modulacji impulsowej (efekt aliasingu) mają niekorzystny wpływ na pracę przekształtników energoelektronicznych tego typu. Muszą

być one – dla uzyskania odpowiedniej jakości sygnału wyjściowego – uwzględniane przy projektowaniu struktur elektrycznych układów tego typu oraz algorytmów ich sterowania.

Jednym z bardzo istotnych i częściowo tylko rozwiązanych jest aspekt współpracy przekształtnika w stopniu silnoprądowym źródła z filtrem wyjściowym zawierającym elementy L i C , które, tworząc obwód rezonansowy, stwarzają niebezpieczeństwo wystąpienia oscylacji. W przypadku niewielkiej wartości współczynnika tłumienia filtra, jako obwodu rezonansowego ich amplituda może osiągnąć znaczne wartości, grożąc uszkodzeniem układu oraz odbiornika. Problem ten, będący głównym przedmiotem artykułu analizowany jest w jego dalszych rozdziałach, w których zaproponowano również metodę jego minimalizacji, a wręcz niemal całkowitej eliminacji.

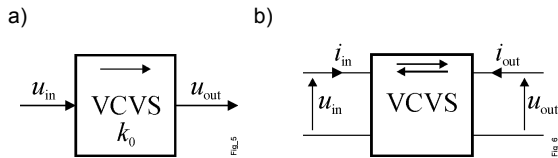
Energoelektroniczne źródła sterowane napięć i prądów jako przekształtniki szerokopasmowe

Jak zaznaczono, zagadnieniem przekształcania energii w sposób optymalny, ze względu na zadania wykonywane przez odbiornik wychodzą naprzeciw energoelektroniczne szerokopasmowe sterowane źródła napięć (VCVS – ang. Voltage Controlled Voltage Source) i prądów (VCCS – ang. Voltage Controlled Current Source) [9]. Określenie tej klasy układów energoelektronicznych jako „źródła sterowane” wywodzi się bezpośrednio od szeroko stosowanej klasy układów elektronicznych, gdzie sygnał wyjściowy jest proporcjonalny (wprost) do sygnału sterującego (rys. 1) jednak nie żąda się od nich znaczącej wydajności prądowej. Stąd, wszystkie aktywne elementy elektroniczne (przysłaby półprzewodnikowe) pracują tam w klasach ciągłych: A, B lub AB, gdzie nie występują zjawiska specyficzne dla pracy impulsowej zaworów półprzewodnikowych.

Traktując VCVS jako czwórnik i opisując go za pomocą macierzy hybrydowej odwrotnej G , sygnały wyjściowe powiązać można z sygnałami wejściowymi następującym wyrażeniem:

$$(1) \quad \begin{bmatrix} i_{in} \\ u_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{in} \\ i_{out} \end{bmatrix}$$

Sterowane źródło napięcia opisane wzorem (1) wyraża jego formę „idealną”.



Rys. 1. Sterowane źródło napięcia oraz sygnały na jego zaciskach (a) oraz źródło przedstawione formalnie jako czwórnik (b). Strzałkami zaznaczono kierunki transmisji sygnałów

Określanie energoelektronicznych sterowanych źródeł napięcia i prądu jako „układów szerokopasmowych” wynika z ich specyficznych – w odniesieniu do sposobu działania – właściwości oraz parametrów:

- oferowane przez te układy pasmo przenoszenia jest porównywalne z częstotliwością pracy modulatora impulsowego, sterującego pracą stopnia mocy, parametry pracy którego stanowią ograniczenie (od góry) użytecznego pasma przenoszenia źródła sterowanego,
- analizując, modelując, a następnie projektując układy tego typu przykładą się szczególną wagę do jakości energetycznego sygnału wyjściowego (napięciowego lub prądowego) rozumiejąc przez „jakość” stopień odwzorowania w energetycznym sygnale wyjściowym sygnału wejściowego (referencyjnego, wzorcowego); stopień odwzorowania oceniany jest przez określone kryterium,
- nie nakłada się żadnych ograniczeń na parametry (kształt) sygnału wejściowego (zadanego) zdając sobie jednak sprawę, że jakość sygnału wyjściowego zależy od kształtu (a zatem widma) sygnału wejściowego z uwagi na dolnoprzepustowy charakter „funkcji przenoszenia” źródła sterowanego,
- uwzględnia się szczegółowo sposób oddziaływania toru sterowania częścią silnoprądową układu na sam sygnał sterujący w kontekście sposobu jego realizacji jako układu cyfrowego,
- uwzględnia się szczegółowo fakt, iż jakość energetycznego sygnału wyjściowego zależy od rodzaju zastosowanej modulacji impulsowej,
- uwzględnia się szczegółowo fakt, iż na jakość energetycznego sygnału wyjściowego wpływa jakość zasilania,
- uwzględnia się wreszcie fakt, iż jakość sygnału wyjściowego zależy również od parametrów przekształtnika pracującego w części wykonawczej układu.

Szczególną wagę przykładą się do trzech aspektów pracy układów tego typu:

- jakości odwzorowania w energetycznym sygnale wyjściowym sygnału zadanego (odniesienia, referencyjnego),
- minimalizacji niekorzystnego oddziaływania układu na środowisko elektromagnetyczne, jak również odporność układu na oddziaływania zewnętrzne (EMC),
- energetycznej sprawności układu.

Jak wynika z przytoczonych wyżej cech źródła sterowanego górna częstotliwość graniczna filtru wyjściowego położona być musi wysoko i znajduje się praktycznie poza zakresem działania (pasmem przenoszenia) regulatora wielkości wyjściowej. Tak więc, regulator (algorytm sterowania) nie może wpływać skutecznie na ew. minimalizację

zjawisk zachodzących w stanach przejściowych związanym z działaniem tego filtru. Z założenia również dopuszcza się zmienność w szerokim zakresie wartości parametrów odbiornika oraz nie nakłada ograniczeń na parametry sygnału referencyjnego. Stosunkowo proste rozwiązanie problemu minimalizacji oscylacji, polegające na zastosowaniu w strukturze filtru elementów stratnych w postaci rezystorów (np. [4]) jest nieefektywne energetycznie i w związku z tym nie jest brane pod uwagę. Innym z wymienionych istotnych aspektów wpływu filtru LC na pracę źródła sterowanego jest zapewnienie stabilności źródła, jako zamkniętego układu regulacji automatycznej. Wymaga on użycia złożonych algorytmów sterowania układem minimalizujących wpływ filtru na „funkcję przenoszenia” tego układu.

Większość przypadków użycia filtrów LC (LCL lub pochodnych) odnosi się do implementacji ich w takim miejscu struktury układu energoelektronicznego, gdzie współpracują one z obwodami elektrycznymi o względnie stałych parametrach (np. siecią elektroenergetyczną) [1-8]. Ponadto, sygnały pobudzające filtr mają charakter wolnozmiennych – quasi-sinusoidalnych. Wpływa to również na stosunkowo nieoscylacyjny charakter jego odpowiedzi. Często też częstotliwość rezonansowa filtru wyjściowego położona jest stosunkowo nisko – w stosunku do częstotliwości nośnej MSI – co umożliwia korygowanie parametrów wielu sygnałów w systemie metodami sprzętowo-programowymi np. [4,5].

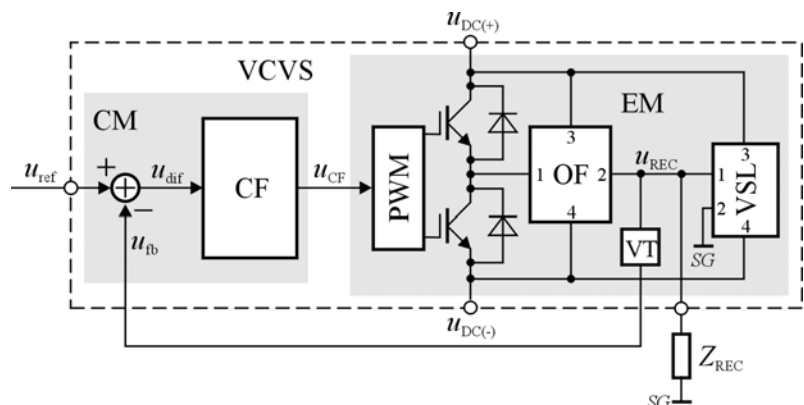
Struktura energoelektronicznego sterowanego źródła napięcia

Strukturę elektryczną w postaci schematu blokowego energoelektronicznego sterowanego źródła napięcia pokazano na rys. 2.

W skład źródła sterowanego wchodzi dwa główne moduły – sterowania (CM) i wykonawczy (EM). Źródło obciążone jest odbiornikiem w postaci impedancji $Z_{REC} = R_{REC} + j\omega L_{REC}$. Na wejście źródła podawany jest sygnał odniesienia u_{ref} , na który, co do jego kształtu, nie nakłada się żadnych ograniczeń.

Moduł sterowania składa się z dwóch bloków wewnętrznych:

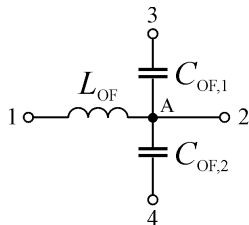
- sumatora sygnałów referencyjnego u_{ref} i sprzężenia zwrotnego u_{fb} , który generuje sygnał błędu sterowania u_{dif} ,
- filtru korekcyjnego (CF) mającego głównie za zadanie ograniczać niekorzystny wpływ filtru wyjściowego na „funkcję przenoszenia” układu; filtr ten wprowadzać może bowiem znaczne przesunięcie (opóźnienie) fazy przenoszonych sygnałów, co może wpływać negatywnie na stabilność układu.



Rys. 2. Schemat blokowy energoelektronicznego sterowanego źródła napięcia

W skład modułu wykonawczego wchodzi takie bloki, jak:

- generator szerokości impulsów (PWM), sterujący pracą przekształtnika energoelektronicznego (tutaj w postaci półmostka),
- filtr wyjściowy typu LC (OF) o strukturze pokazanej na rys. 3,
- blok VSL ogranicznika-tłumika składowej oscylacyjnej napięcia na wyjściu filtru LC (i odbiorniku),
- przetwornik pomiarowy napięcia (VT), który generuje na swoim wyjściu sygnał sprzężenia zwrotnego: $u_{fb} = k_{VT} u_{REC}$, gdzie $k_{VT} = \text{const}$.



Rys.3. Filtr wyjściowy

Zaproponowany filtr wyjściowy posiada zmodyfikowaną konfigurację w stosunku do zwykle stosowanej, w przypadku której pojemność na wyjściu filtru dołączona byłaby do *masy układu* – punktu SG na rys. 2 (masą układu może być np. przewód zerowy sieci). Zmodyfikowana struktura filtru, zawierająca dwie pojemności dołączone do szyn zasilania przekształtnika zamiast *masy układu*, posiada następujące zalety:

- zmniejsza obciążenie prądowe przewodu powrotnego (czyli *masy układu*), pozwalając na częściowy zwrot energii zgromadzonej w elementach filtru (i ew. odbiornika) bezpośrednio do źródła zasilania,
- kondensatory na wyjściu filtru stanowią dodatkowe elementy tłumiące szумы i zakłócenia związane z napięciami zasilającymi układ: $u_{DC(+)}$ i $u_{DC(-)}$,
- kondensatory pozwalają na zmniejszenie mocy strat w elementach (diodach szybkich) znajdujących się w bloku VSL poprzez częściowe przejęcie (w stanach przejściowych) ich prądów przewodzenia.

Blok VSL

Praca bloku VSL związana jest z możliwością wystąpienia w napięciu wyjściowym filtru składowych przejściowych o charakterze oscylacji powodowanych przez efekt rezonansu w obwodzie $L_{OF} - L_{REC} - C_{OF}$. Składowe oscylacyjne w napięciu wyjściowym filtru nazywane są dalej również przepięciami.

Problem ten jest ogólnie znany i związany ze zbyt małą (mniejszą od 1) wartością stałej charakterystycznej filtru w postaci współczynnika tłumienia δ_{OF} , co ma miejsce dla (relatywnie) dużych wartości rezystancji odbiornika. Problem ten uwidacznia się zwłaszcza przy skokowym (szybkochmiennym) charakterze przebiegu napięcia na wejściu filtru lub skokowej zmianie (wzroście) rezystancji odbiornika.

Zakładając $L_{REC} = 0$ współczynnik tłumienia dany jest następującym wzorem:

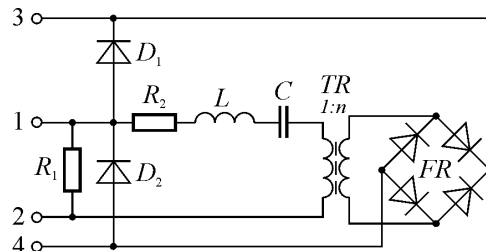
$$\begin{aligned} \delta_{OF} &= \frac{1}{2R_{REC}} \sqrt{\frac{L_{OF}}{C_{OF,1} + C_{OF,2}}} \Big|_{C_{OF,1}=C_{OF,2}=C_{OF}} = \\ (2) \quad &= \frac{1}{2\sqrt{2}R_{REC}} \sqrt{\frac{L_{OF}}{C_{OF}}} \end{aligned}$$

W celu eliminacji składowej oscylacyjnej w napięciu wyjściowym źródła winna zatem zachodzić nierówność:

$$(3) \quad R_{REC} \leq \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L_{OF}}{C_{OF}}},$$

której, w praktyce – czyli przy zmieniającej się w szerokim zakresie rezystancji odbiornika – nie da się spełnić!

Schemat wewnętrzny bloku VSL pokazano na rys. 5. W jego skład wchodzi elementy związane z funkcjami tzw. twardego ograniczania i tłumienia przepięć (składowej oscylacyjnej) na wyjściu filtru.



Rys.4. Schemat ideowy bloku VSL

Pierwsza z wymienionych funkcji układu realizowana jest przez parę diod szybkich D_1 i D_2 , które, wchodząc w stan przewodzenia, ograniczają przepięcia do (przybliżonego) zakresu $\langle u_{DC(-)}, u_{DC(+)} \rangle$. W sytuacji, kiedy wartość szczyt-szczyt napięcia u_{REC} jest mniejsza (lub znacząco mniejsza) od tego zakresu blok VSL realizuje drugą z funkcji, której przypisane są: szeregowy obwód rezonansowy RLC (złożony z elementów: R_2 , L i C) transformator impulsowy TR z włączonym szeregowo w obwód rezonansowy uzwojeniem pierwotnym oraz prostownik szybki FR na jego wyjściu, który włączony jest w obwód DC przekształtnika. Obwód RLC dostrojony jest do częstotliwości rezonansu własnego ω_{OF} filtru wyjściowego, natomiast przekładnia transformatora $n \gg 1$. Tak dobrane parametry bloku VSL pozwalają na skuteczne tłumienie składowych oscylacyjnych w napięciu u_{REC} w szerokim zakresie zmian jego amplitudy.

W przypadku, kiedy $L_{REC} > 0$ zmianie ulega również częstotliwość rezonansowa układu filtr wyjściowy-odbiornik ω_{OF-REC} , osiągając maksymalną wartość:

$$(4) \quad \omega_{OF-REC} = \sqrt{2} \omega_{OF} : L_{REC} = L_{OF}.$$

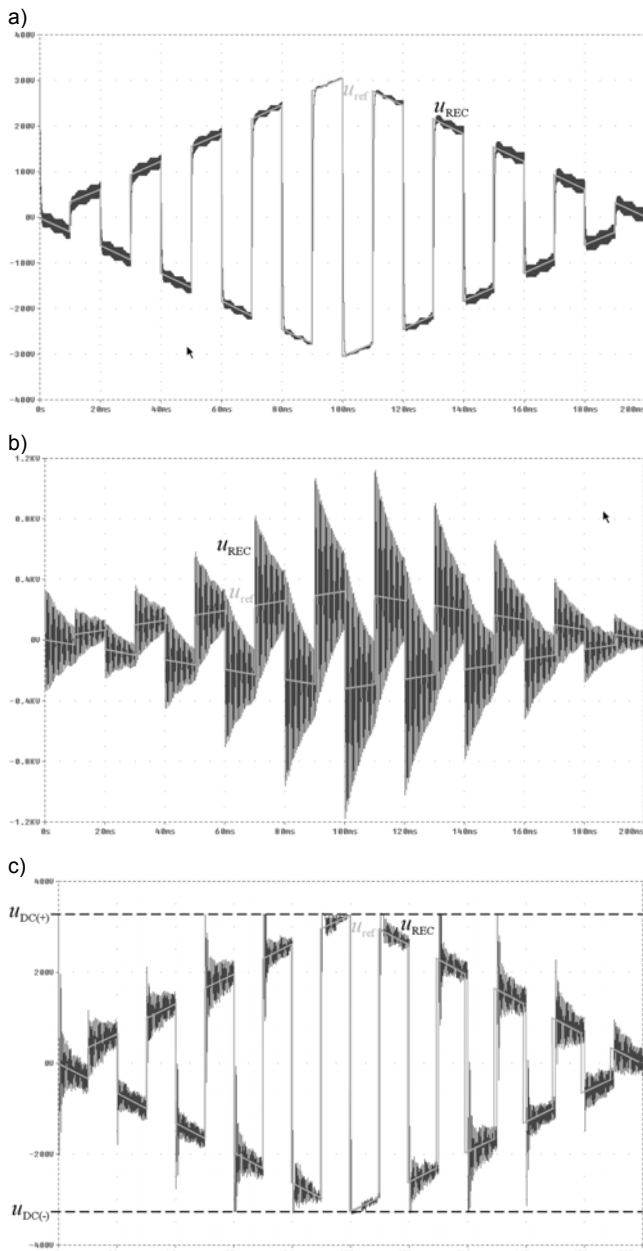
Fakt ten należy wziąć pod uwagę i w ten sposób dobrać wartość dobroci obwodu rezonansowego (poprzez odpowiednie relacje wartości elementów R_2 , L i C), aby jego pasmo przenoszenia było odpowiednio szerokie. Jak wynika z (4) maksymalna względna wartość zmiany częstotliwości rezonansowej układu wynosi ok. 41 %.

Wartość mocy przenoszanej przez blok VSL osiąga wartość największą w sytuacji, kiedy odbiornik jest odłączony. Wartość ta jest względnie stała (w funkcji zmian rezystancji odbiornika), stosunkowo niewielka, i nie zależy od mocy znamionowej źródła sterowanego. Straty energii w elementach R_2 i TR są nieznaczne z punktu widzenia sprawności energetycznej źródła. Oszacowania wartości mocy przenoszanej przez blok oraz jego strat własnych dokonano w oparciu o model symulacyjny źródła sterowanego.

Zastosowany w bloku VSL rezystor R_1 wpływa stabilizującą na jego pracę w sytuacji odłączonego odbiornika. Ponieważ zakładana relacja wartości rezystancji R_1 i rezystancji znamionowej odbiornika $R_{REC,n}$ jest rzędu 1000:1, nie powoduje on zauważalnego spadku sprawności energetycznej układu.

Badania modelu symulacyjnego

W celu wstępnej weryfikacji założeń teoretycznych związanych z pracą źródła sterowanego – szczególnie w odniesieniu do bloku VSL – dokonano badań jego modelu symulacyjnego.



Rys.5. Przebieg napięcia na wyjściu filtru (kol. ciemnoszary) na tle napięcia referencyjnego (kol. jasnoszary) w sytuacji: a) znamionowej wartości rezystancji odbiornika ($\delta_{OF}=1$), b) odłączonych odbiornika i bloku VSL, c) odłączonego odbiornika przy dołączonym bloku VSL

Model zaimplementowano w środowisku ORCAD/PSpice, a jego podstawowe parametry są następujące: $u_{DC(+)}=325$ V, $u_{DC(-)}=-325$ V, $P_{REC,n}=9,3$

kW, $L_{OF}=1$ mH, $C_{OF,1}=C_{OF,2}=3$ uF, $R_{REC,n}=5,7$ Ω , wartość częstotliwości nośnej MSI: $f_C=10$ kHz. W celu wymuszenia oscylacji napięcia na wyjściu filtru sygnał referencyjny miał (dominująco) kształt quasi-prostokątny o niewielkich – w stosunku do stałej czasowej filtru (wynoszącej ok. 500 us) – wartościach czasów narastania i opadania, wynoszących 50 us.

Charakterystyczne – reprezentatywne dla pracy modelu – przebiegi napięć pokazano na rys. 5. I tak: na rys. 5 a) pokazano przypadek pracy układu przy braku oscylacji w napięciu wyjściowym filtru – występujący dla $\delta_{OF} \geq 1$, a rys. 5 b) ukazuje pracę układu przy odłączonych odbiorniku i bloku VSL. W tym przypadku wartość współczynnika tłumienia jest najmniejsza, co skutkuje prawie 4-krotnym wzrostem amplitudy napięcia wyjściowego w stosunku do wartości znamionowej. W praktyce oznaczałoby to uszkodzenie układu. Zastosowanie bloku VSL – rys. 5 c) – sprowadza przebieg napięcia na wyjściu filtru niemal do przypadku, jak na rys. 5 a). Widoczne są tam wyraźnie efekty pracy bloku związane tak z ograniczaniem (do wartości ok. ± 325 V), jak i tłumieniem amplitudy składowej oscylacyjnej.

Moc przenoszona przez blok VSL jest największa w przypadku odłączonego odbiornika i wynosi – dla wymienionych wcześniej parametrów układu – ok. 105 W. W przypadku $\delta_{OF}=1$ spada ona do wartości ok. 65 W. Szacowana moc strat własnych bloku to odpowiednio 25 i 10 W. Wartości tych mocy (w zasadzie) nie zależą od wartości mocy znamionowej źródła sterowanego zależą natomiast od wartości napięcia w obwodzie (obwodach) DC przekształtnika, rosnąc z jego wartością.

Blok VSL wpływa również korzystnie na uproszczenie tak struktury (w sensie eliminacji konieczności pomiaru pewnych wielkości elektrycznych, np. [4,5]), jak i algorytmu sterowania częścią wykonawczą źródła. Sprowadza bowiem jego zachowanie do przypadku $\delta_{OF} \geq 1$ i to praktycznie niezależnie od rzeczywistej wartości rezystancji odbiornika.

Podsumowanie

Jednym z głównych czynników utrudniających zastosowanie w układach energoelektronicznych filtrów LC jest ich skłonność do generowania składowych oscylacyjnych. Wartości amplitud tych składowych – w warunkach zmieniających się wartości rezystancji odbiornika – mogą znacząco wykraczać poza warunki znamionowe pracy układu, będąc przyczyną jego uszkodzenia. Struktura zaprezentowanego w artykule energoelektronicznego źródła napięcia uzupełniona została o blok ograniczania-tłumienia amplitudy składowej oscylacyjnej napięcia na wyjściu filtru. Badania modelu symulacyjnego układu wskazały na wysoką skuteczność działania tego bloku. Jednocześnie – w kontekście energetycznym – negatywny wpływ bloku na pracę układu jest niewielki i nie powoduje zauważalnego pogorszenia sprawności energetycznej źródła sterowanego. Z drugiej strony, pamiętać należy o tym, że eliminacja z napięcia wyjściowego szybkozmiennych składowych prowadzi bezpośrednio do ograniczenia strat własnych w elementach filtru (a zarazem odbiornika). Stąd, w zależności od parametrów układu, użycie opisywanego bloku prowadzi może wręcz do wzrostu jego sprawności.

W kontekście ekonomicznym zastosowania proponowanej struktury w układzie technicznym, zakłada się, że w związku z jej prostotą oraz niewielką wartością przenoszonej mocy spowoduje nieznaczny tylko wzrost kosztów jego realizacji.

Kolejnym zakładanym etapem prac jest weryfikacja osiągniętych dotąd wyników na bazie modelu laboratoryjnego energoelektronicznego źródła sterowanego napięcia.

LITERATURA

- [1] Machowski J., Elastyczne systemy przesyłowe FACTS, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2002), No 7, 189-196
- [2] Liserre M., Blaabjerg F., Hansen S., Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier, *IEEE Transactions on Industry Applications*, (2005), Vol. 41, No. 5, 1281–1291
- [3] Araújo S. V., Engler A., Sahan B., Kassel V. U., Luiz F., Antunes M., LCL Filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines, *The 7th International Conference on Power Electronics*, (2007), 1133–1138
- [4] Lettl J., Bauer J., Linhart L., Comparison of Different Filter Types for Grid Connected Inverter, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Marrakesh, MOROCCO, (2011), 1426-1429
- [5] Dannehl J., Liserre M., Fuchs F. W., Filter-Based Active Damping of Voltage Source Converters With LCL Filter, *IEEE*

- TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, (2011), Vol. 58, No. 8, 3623-3633
- [6] Wojciechowski D., Strzelecki R., Obwód LCL dla systemów równoległej kompensacji aktywnej, *X Konf. Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE 2011*, Łódź, (2011)
- [7] Tang Y., Loh P. C., Wang P., Choo F. H., Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter With Output LCL Filter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (2012), Vol. 59, No. 3, 1443–1452
- [8] Reznik A., Simões M. G., Al-durra A., Muyeen S. M., LCL Filter Design and Performance Analysis for Small Wind Turbine Systems, *Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA)*, *IEEE*, (2012), 1–7
- [9] Gwóźdź M., Power Electronics Wide Band Controlled Current and Voltage Sources Based on Multi-channel Inverters, (in polish), *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), No 10A, 132-134

Autor: dr hab. inż. Michał Gwóźdź, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: Michal.Gwozdzy@put.poznan.pl.